



DEUTSCHES
PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 38 20 170.4
22 Anmeldetag: 14. 6. 88
43 Offenlegungstag: 21. 12. 89

51 Int. Cl. 4
G 01 J 9/02
G 01 D 5/26
G 01 B 11/26
G 01 B 11/02
G 01 K 11/00

DE 3820170 A1

71 Anmelder:

Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, 8012
Ottobrunn, DE

72 Erfinder:

Maier, Josef, Dr., 8000 München, DE

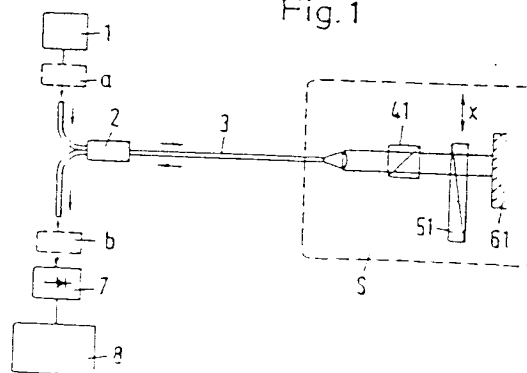
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Meßgeber zur Messung physikalischer Größen

Der Meßgeber zur Messung physikalischer Größen ist mit einer Lichtquelle ausgestattet, deren Licht in einem Interferometer, dessen optische Weglänge mit der zu messenden Größe korreliert ist, interferiert, sowie mit einer Lichtempfangseinrichtung, deren Ausgangssignal an eine Auswerteeinheit angelegt ist, die aus dem Interferogramm die zu messende Größe bestimmt. Bei diesem Meßgeber werden folgende Merkmale kombiniert:

- die Frequenz der Lichtquelle oder die Frequenz des Lichts, das die Lichtempfangseinrichtung registriert, variiert kontinuierlich in einem bestimmten Frequenzbereich,
- die Lichtempfangseinrichtung mißt die Intensität des Lichts in Zuordnung zur Frequenz,
- die Auswerteeinheit bestimmt aus der Abhängigkeit des Ausgangssignals der Lichtempfangseinrichtung von der Frequenz des registrierten Lichts die zu messende Größe. Dadurch läßt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen der gemessenen interferometrischen Größe und der zu messenden physikalischen Größe, z. B. einem Weg, einem Winkel oder einer Temperatur erzielen.

Fig. 1



DE 3820170 A1

Die Erfindung bezieht sich auf einen Meßgeber zur Messung physikalischer Größen gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Derartige Meßgeber zur Messung physikalischer Größen, wie beispielsweise von Wegen, Winkeln oder Temperaturen, arbeiten nach dem Prinzip eines Interferometers. Das Interferometer kann dabei beispielsweise ein Michelson-Interferometer, ein polarisationsoptisches Interferometer oder ein sonstiges Interferometer sein. Bezüglich der Grundlagen derartiger Interferometer wird auf gängige Optiklehrbücher verwiesen.

Allen bekannten Interferometern ist gemeinsam, daß sie mit einer oder mehreren festen Wellenlängen auf der Sende- und/oder Empfangsseite arbeiten. Auch bei Interferometern, die mit der sogenannten Heterodyn-Empfangstechnik arbeiten, wird zwar in einem Interferometerzweig eine Wellenlängenverschiebung beispielsweise mittels einer Bragg-Zelle vorgenommen, als Meßgröße dient aber die zeitlich sich ändernde Phase des anderen Zweiges, des sog. Meßzweiges.

Nachteilig bei bekannten Interferometern ist, daß kein einfacher Zusammenhang zwischen der zu messenden Größe, also beispielsweise einem Weg, und den gemessenen interferometrischen Größen besteht. Darüberhinaus erlauben die bekannten Interferometer zwar die genaue Messung von Wegunterschieden, jedoch nicht die Abolutmessung von Wegen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen nach dem interferometrischen Prinzip arbeitenden Meßgeber zur Messung physikalischer Größen anzugeben, bei dem ein einfacher Zusammenhang zwischen der gemessenen interferometrischen Größe und der zu messenden physikalischen Größe, z.B. einem Weg, einem Winkel oder einer Temperatur besteht.

Eine erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe ist mit ihren Weiterbildungen in den Patentansprüchen gekennzeichnet.

Die Erfindung geht von dem Grundgedanken aus, die Wellenlänge vor oder hinter der Interferometeranordnung in einem Wellenlängenbereich mit einer bestimmten Mindestbreite durchzustimmen.

Hierdurch ergibt sich nicht nur ein einfacher Zusammenhang zwischen der zu messenden Größe und der interferometrisch gemessenen Größe, sondern vor allem auch die Möglichkeit, nicht nur Wegänderungen, sondern auch absolute Weglängen zu messen.

Bekannte interferometrische Meßgeber ermöglichen dagegen — wie bereits ausgeführt — lediglich die genaue Bestimmung von Wegänderungen.

Der erfindungsgemäß vorgeschlagene Meßgeber erlaubt damit sowohl eine absolute Wegmessung als auch eine relative Wegmessung. Die absolute Wegmessung erfolgt über die Messung einer wegproportionalen Frequenz; zusätzlich ist es gemäß Anspruch 10 möglich, eine sehr genaue relative Wegmessung über die Bestimmung der Phasenlage durchzuführen.

Dabei können beliebige physikalische Größen, wie Weg, Winkel und/oder Temperaturen gemessen werden, sofern diese nur zu einer Weg- bzw. Phasenänderung führen.

In jedem Falle ist es besonders vorteilhaft, wenn die Frequenz sender- oder empfängerseitig linear um einen Mittelwert variiert, da sich dann auch ein linearer Zusammenhang zwischen den einzelnen Größen ergibt (Anspruch 2).

Als Interferometer können im Prinzip beliebige Interferometer, beispielsweise polarisationsoptische Interferometer (Anspruch 3) oder Michelson-Interferometer (Anspruch 7) verwendet werden.

In den Ansprüchen 4 bis 6 bzw. 8 sind "Geber-elemente" angegeben, deren Stellung die Frequenz bzw. die Phase beeinflußt, und deren Lage zur zu messenden Größe korreliert ist.

Der erfindungsgemäße Meßgeber eignet sich dabei insbesondere als faseroptischer Weggeber (Anspruch 9). Dabei können die in den vielfältigsten Formen vorhandenen Komponenten, wie Lichtwellenleiter -stecker, -verzweiger, faseroptische Sender und Empfänger verwendet werden.

In jedem Falle behält der erfindungsgemäße Meßgeber die bekannten Vorteile von faseroptischen Meßgebern, wie einfacher Aufbau und eine störungsfreie, von elektromagnetischen Einstreuungen nicht beeinflussbare Übertragung von Meßsignalen.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben, in der zeigen:

Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 2 ein zweites Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Fig. 3 ein drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung, und

Fig. 4 ein viertes Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Bei den im folgenden beschriebenen vier Ausführungsbeispielen handelt es sich ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens um faseroptische Weggeber. Bei faseroptischen Weggebern kommen die vorstehend angesprochenen und nachstehend näher erläuterten Vorteile der Erfindung besonders zum Tragen. Es bedarf aber keiner näheren Erläuterung, daß die erfindungsgemäßen Grundgedanken auch bei anderen Meßgebern, die nicht notwendigerweise faseroptische Meßgeber sind, noch deren Meßgrößen Wege bzw. Wegänderungen sein müssen, anwendbar sind.

Weiter arbeiten ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens die in den Fig. 1 bis 3 dargestellten Ausführungsbeispiele als polarisationsoptische Interferometer und das in Fig. 4 dargestellte Ausführungsbeispiel als Michelson-Interferometer. Selbstverständlich können aber auch andere Interferometrie-Prinzipien Verwendung finden.

Sämtlichen Ausführungsbeispielen ist gemeinsam, daß das Licht einer Lichtquelle 1 mittels eines Y-Kopplers 2 in einen Lichtwellenleiter (Faser) 3 eingekoppelt wird. Am lichtaustrittseitigen Ende des Lichtwellenleiters, das sich in einem Sensorkopf S befindet, tritt das Licht in ein Interferometer ein, das für die einzelnen Ausführungs-

beispiele weiter unten näher beschrieben wird.

Das interferierende Licht wird wieder in den Lichtwellenleiter 3 eingekoppelt, tritt aus dem Y-Koppler 2 aus und trifft auf eine Lichtempfangseinrichtung 7 mit nachgeschalteter Auswertelektronik 8 auf.

Ferner sind senderseitig und/oder empfängerseitig Scanning-Einheiten *a* bzw. *b* vorgesehen, mit denen die gesendete bzw. die empfangene Lichtfrequenz variiert ist, und die ebenfalls nachfolgend noch beschrieben werden.

Die in den Fig. 1 bis 4 gezeigten Ausführungsbeispiele unterscheiden sich insbesondere durch den Aufbau der jeweils verwendeten Interferometer.

So weist das in Fig. 1 dargestellte Ausführungsbeispiel einen Polarisator-Analysator 41, einen doppelbrechenden Kristall 51, beispielsweise einen Quarzkeil, einen Quarzkompensator, einen Calcitkompensator usw., dessen Stellung in Richtung eines Pfeils *x* mit der zu messenden Größe korreliert ist, sowie einen Spiegel 61 auf.

Das in Fig. 2 dargestellte Ausführungsbeispiel weist dagegen einen Polarisator-Analysator 42, einen polarisierenden Strahlteiler 52, der gegenüber dem Polarisator-Analysator um 45° gedreht ist, einen Glaskeil 62, dessen Verschiebung in Richtung des Pfeils *x* mit der zu messenden Größe korreliert ist, sowie Spiegel 62₁ und 62₂ in den Strahlengängen des Strahlteilers 52 auf.

Bei dem in Fig. 3 dargestellten dritten Ausführungsbeispiel sind ebenfalls ein Polarisator-Analysator 43 und ein polarisierender Strahlteiler 53 vorhanden, dessen Polarisationssebene um 45° gegenüber dem Polarisator-Analysator 43 gedreht ist. Ferner sind eine in Richtung eines Pfeils drehbare Glasplatte 63 sowie Endspiegel 63₁ und 63₂ in den beiden Strahlengängen des Strahlteilers 53 vorhanden.

Der Drehwinkel der planparallelen Glasplatte 63 ist mit der zu messenden Größe korreliert. Bei dem gezeigten Ausführungsbeispiel ist die zu messende physikalische Größe ebenfalls eine Verschiebung in Richtung des Pfeils *x*. Hierzu ist die drehbare Glasplatte 63 an einem nur schematisch dargestellten in Richtung des Pfeils *x* verschiebbar geführten Element drehbar angelenkt.

Während die vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele polarisationsoptische Interferometer beinhalten, kommt bei dem in Fig. 4 dargestellten vierten Ausführungsbeispiel ein Michelson-Interferometer zum Einsatz. Dieses besteht aus einem Strahlteiler 44, einem in Richtung des Pfeils *x* verschiebbaren Glaskeil 54, dessen Verschiebung mit der zu messenden physikalischen Größe korreliert ist, sowie Endspiegeln 64₁ und 64₂ in den beiden Strahlengängen nach dem Strahlteiler 44.

Im folgenden soll die Funktionsweise der vorstehend erläuterten Ausführungsbeispiele beschrieben werden: Im Falle der in den Fig. 1 bis 3 dargestellten polarisationsoptischen Interferometer wird der Einfluß der Meßgröße "Weg" auf die differentielle Phase σ und somit auf den Polarisationszustand gemessen. Durchlaufen die beiden orthogonalen Polarisationsmoden einer linear polarisierten Lichtwelle der Wellenlänge verschiedene optische Wege bzw. verschiedene optische Medien mit Brechungsindizes n_1 und n_2 , z. B. einen doppelbrechenden Kristall, erfahren sie eine differentielle Phasenänderung.

$$\sigma = K \Delta(l n) \quad k = 2\pi/\lambda \quad (1)$$

$$\Delta(l n) = \Delta l n + l \Delta n \quad (2)$$

Nach dem Durchgang durch einen zweiten Polarisator ist die Intensität *I*

$$I = I_0 \sin^2 \sigma/2 \quad (3)$$

wobei I_0 die Eingangsintensität ist. Die Intensitätsänderung ist damit von den Parametern l , n , λ abhängig. Wenn sich die Frequenz der ankommenden Lichtwelle zeitlich ändert, erhält man ein zeitlich sich änderndes Ausgangssignal.

$$I = I_0/2 \cdot (1 - \cos 2\pi \Delta(l n)/\lambda(t)) \quad (4)$$

Die Änderung von $\lambda(t)$ soll derart geschehen, daß λ bei der Zentralwellenlänge λ_0 in einem kleinen Bereich schwingt ($\Delta\lambda \ll \lambda_0$).

Für eine lineare Zeitabhängigkeit ($\Delta\lambda = a t$) erhält man:

$$\lambda = \lambda_0 \pm \Delta\lambda \quad (5)$$

$$I = I_0/2 \cdot (1 - \cos 2\pi \Delta(l n)/\lambda_0 \cdot (1 - a t/\lambda_0)) \quad (6)$$

Neben einem Gleichlichtanteil, der prinzipiell durch Messung des Quadratursignals und Differenzbildung oder durch Filterung eliminiert werden kann, ergibt sich ein oszillierendes Signal mit der Frequenz *f* und mit der Phase Θ .

$$f = \Delta(l n)/a \lambda_0^2 \quad (7)$$

$$\Theta = 2\pi \Delta(l n)/\lambda_0 \quad (8)$$

Grundsätzlich läßt sich damit aus der gemessenen Signalfrequenz *f* oder aus der Phase Θ eine Information über *l* gewinnen. Das Entscheidende ist dabei, daß die Frequenz *f* eindeutig einer Länge *l* zugeordnet ist und umgekehrt. Es gibt keine Periodizität wie bei der Phasenmessung. Die Bedingung, daß mindestens eine volle

Schwingung vorliegt, lautet:

$$\Delta\lambda > \lambda_0^2 / \Delta(ln) \quad (9)$$

5 Daraus ergeben sich sehr hohe, im GHz-Bereich liegende Frequenzverschiebungen, womit Bragg-Zellen zur Frequenz- bzw. Wellenlängenverschiebung ausscheiden.

Bei dem in Fig. 4 dargestellten Michelson-Interferometer ergeben sich prinzipiell ähnliche Gleichungen für die Intensitätsmodulation.

10 Bei dem erfindungsgemäßen Meßgeber kann entweder die Frequenz oder die Phase zur Messung der zu messenden physikalischen Größe bestimmt werden:

a) Frequenzmessung:

$$f = \Delta(ln)a/\lambda_0^2$$

15 Zum Beispiel erhält man für $l = 1$ cm, $\Delta n = 0.5$ (Luft-Glas), $\lambda_0 = 800$ nm, $a = 100$ nm/sec eine Frequenz von $f = 800$ Hz. Für die Genauigkeit bzw. Stabilität der Messung ist wichtig, daß a extrem konstant und n von Parametern wie Temperatur, Druck usw. nicht abhängt. Für den Fehler Δf ergibt sich, wenn die Frequenz mit der Genauigkeit $\Delta f/f$ gemessen wird.

$$20 \quad \Delta f/f = 1 \cdot \Delta f/f \quad (10)$$

b) Phasenmessung:

$$\Theta = 2 \pi \Delta(ln) / \lambda_0$$

25 $\Theta = 2$ s entspricht damit einer Länge von $\lambda_0 / \Delta n$; das ist die entsprechende Länge eines doppelten Hell-Dunkelüberganges in einer Interferometeranordnung.

Für den Fehler $\Delta\Theta$ bei der Phasenmessung ergibt sich:

$$30 \quad \left. \begin{aligned} \Delta\Theta &= 2 \pi \Delta(\Delta(ln)_\Theta) / \lambda_0 \\ \Delta\Theta / 2\pi &= \Delta f/f \end{aligned} \right\} 2 \pi \Delta(\Delta(ln)_\Theta) / \lambda_0 = 2 \pi \Delta f/f$$

$$35 \quad \Delta l_\Theta = \lambda_0 / (1 \Delta n \cdot \Delta l_f) \quad (11)$$

Bei der Phasenmessung ist der Fehler in l ca. 10^{-2} mal kleiner als bei der Frequenzmessung, vorausgesetzt, Δf und $\Delta\Theta$ sind äquivalent bzw. beide Male gleich ($\Delta\Theta/2\pi = \Delta f/f$).

40 Da das wesentliche Element des erfindungsgemäßen Meßgebers eine durchstimmbare Lichtquelle bzw. ein durchstimmbarer Lichtempfänger ist, durch den eine absolute Wegmessung möglich ist, sollen im folgenden technische Lösungsmöglichkeiten für derartige Lichtquellen bzw. Lichtempfänger erläutert werden. Diese Elemente sind in den Figuren schematisiert mit a bzw. b dargestellt.

Im Folgenden wird ein Verfahren zur senderseitigen und empfängerseitigen Durchstimmung der Wellenlänge beschrieben:

a) Durchstimmung der Lichtquelle

50 In jüngster Zeit werden von verschiedenen Stellen Anstrengungen unternommen, wellenlängendurchstimmbare Halbleiterlaser zu entwickeln. Derartige Laser werden in der Datenübertragungstechnik z. B. für das Wellenlängenmultiplexen benötigt. Für das vorgeschlagene Verfahren müßte der Laser eine Bandbreite von ca. 0,1 nm und einen Durchstimmbereich von einigen Nanometern aufweisen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Scangeschwindigkeit. Sie sollte in der Größenordnung von 100 nm/sec liegen, um ausreichend hohe Frequenzen bzw. Frequenzänderungen des Detektorsignals zu erhalten.

b) Filterung einer Lichtquelle, z. B. LED

55 Eine relativ breitbandige Lichtquelle ($\Delta\lambda \sim 5-10$ nm), z. B. LED, wird in einer Einrichtung schmalbandig gefiltert. Zusätzlich ist die Möglichkeit gegeben, diese schmalbandige Linie über den Bereich $\Delta\lambda$ zu verschieben, d. h. den Bereich $\Delta\lambda$ kontinuierlich durchzuscannen. Prinzipiell läßt sich das mit geeignet bewegten Gittern, Prismen oder Fabry-Perot-Interferometern erreichen. Lösungen mit Gittern und Prismen haben den Nachteil, daß sie mechanisch nur sehr aufwendig zu realisieren sind. Aus dem Grund wird auf diese Verfahren nicht näher eingegangen. Mit einem piezoelektrisch gesteuerten "central-spot scanning Fabry-Perot", bei dem ein linearer Zusammenhang zwischen der Wellenlängenverschiebung $\sigma\lambda$ und Δx (Δx ist Abstand der Platten) besteht, ist die Forderung einer linearen Durchstimmung der Wellenlänge einfach zu realisieren. Der freie Spektralbereich ($\Delta\lambda$) ist dabei so zu wählen, daß er innerhalb von $\Delta\lambda$ liegt und die spektrale Breite γ ($\gamma = \Delta\lambda$ ist der geforderten Kohärenzlänge anzupassen. Die Kohärenzlänge ($l_{coh} = \lambda_0^2/\gamma$) hängt vom Meßbereich des Sensors ab.

Eine weitere Möglichkeit der Wellenlängendurchstimmung bieten die in jüngster Zeit verfügbaren akustoop-

tischen Filter (z. B. Matsushita Electric). Diese Filter können wie ein Gitter bei hoher Geschwindigkeit und ohne mechanische Teile aus weißem Licht monochromatisches Licht herausfiltern. Die prinzipielle Funktion besteht darin, daß durch Anlegen eines hochfrequenten elektrischen Signals der Kristall nur Licht einer bestimmten Wellenlänge durchläßt. Zwischen angelegter Hochfrequenz und durchgelassener Wellenlänge besteht ein direkter Zusammenhang, so daß durch Sweepen mit der Hochfrequenz der Wellenlängenbereich $\Delta\lambda$ genügend schnell durchgescannt werden kann. Die Problematik dieses Verfahrens liegt in der Auflösung. Zur Zeit liegt diese bei 0,5 nm, so daß sich nur Kohärenzlängen im mm-Bereich ergeben.

Auf der Empfängerseite gibt es die Möglichkeit, die Verfahren unter 1b anzuwenden. Die breitbandige Sendelichtquelle wird nicht vor dem eigentlichen Sensor gefiltert bzw. gescannt, sondern erst nach dem Sensorkopf, unmittelbar vor dem Photoempfänger. Es läßt sich zeigen, daß diese Anordnung äquivalent ist zu dem Verfahren unter 1b. Die Frequenz und die Phase des Detektorsignals hängen in der gleichen Weise von den Sensorparametern Δ, l, n, a ab.

$$f = \Delta(l/n) \cdot a/\lambda_0^2$$

$$\Theta = 2 \pi \Delta(l/n)/\lambda_0$$

Patentansprüche

1. Meßgeber zur Messung physikalischer Größen mit einer Lichtquelle, deren Licht in einem Interferometer, dessen optische Weglänge mit der zu messenden Größe korreliert ist, interferiert, und mit einer Lichtempfangseinrichtung, deren Ausgangssignal an eine Auswerteeinheit angelegt ist, die aus dem Interferogramm die zu messende Größe bestimmt, **gekennzeichnet durch** die Kombination folgender Merkmale:
 - die Frequenz der Lichtquelle oder die Frequenz des Lichts, das die Lichtempfangseinrichtung registriert, variiert kontinuierlich in einem bestimmten Frequenzbereich,
 - die Lichtempfangseinrichtung mißt die Intensität des Lichts in Zuordnung zur Frequenz,
 - die Auswerteeinheit bestimmt aus der Abhängigkeit des Ausgangssignals der Lichtempfangseinrichtung von der Frequenz des registrierten Lichts die zu messende Größe.
2. Meßgeber nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz linear um einen Mittelwert variiert.
3. Meßgeber nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Interferometer ein polarisationsoptisches Interferometer ist.
4. Meßgeber nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Element des Interferometers, dessen Lage zur zu messenden Größe korreliert ist, ein Glaskeil ist.
5. Meßgeber nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Element des Interferometers, dessen Lage zur zu messenden Größe korreliert ist, eine drehbare planparallele Platte ist.
6. Meßgeber nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Element des Interferometers, dessen Lage zur zu messenden Größe korreliert ist, ein verschiebbarer doppelbrechender keilförmiger Kristall ist.
7. Meßgeber nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Interferometer ein Michelson-Interferometer ist.
8. Meßgeber nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Element des Interferometers, dessen Lage zur zu messenden Größe korreliert ist, ein Glaskeil ist.
9. Meßgeber nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Meßgeber ein faseroptischer Meßgeber ist.
10. Meßgeber nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerteeinheit zur genauen Bestimmung der zu messenden Größe die Phase und zur absoluten Bestimmung die Frequenzmodulation heranzieht.
11. Verwendung eines Meßgebers nach einem der Ansprüche 1 bis 10 zur Weg- oder Winkelmessung.
12. Verwendung eines Meßgebers nach einem der Ansprüche 1 bis 10 zur Temperaturmessung.

3820170

13

Fig. 2

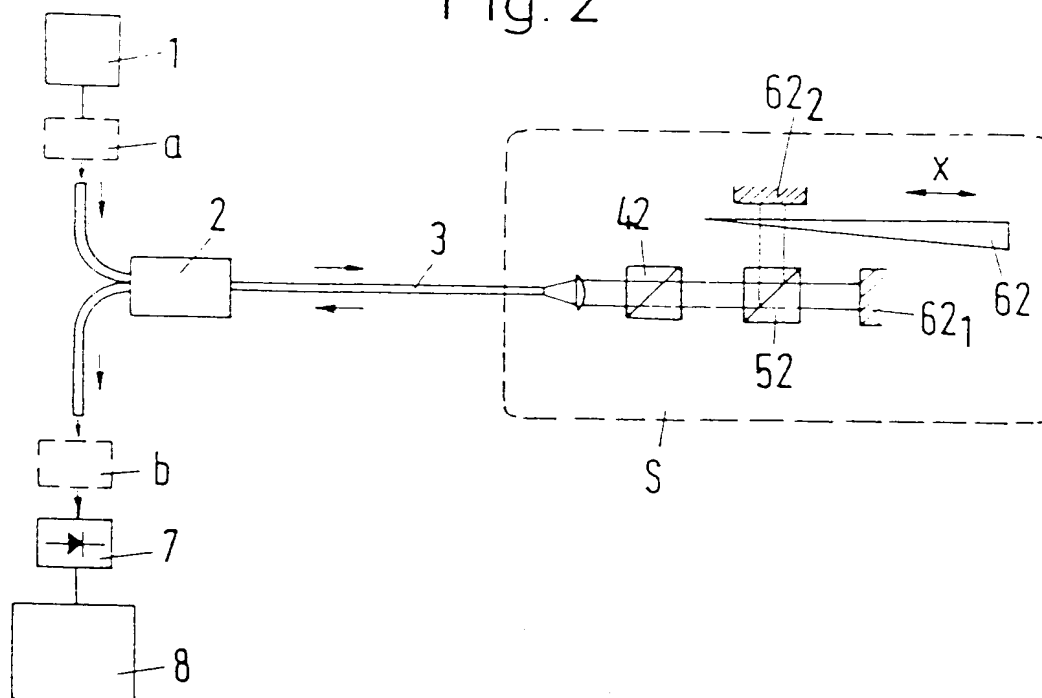
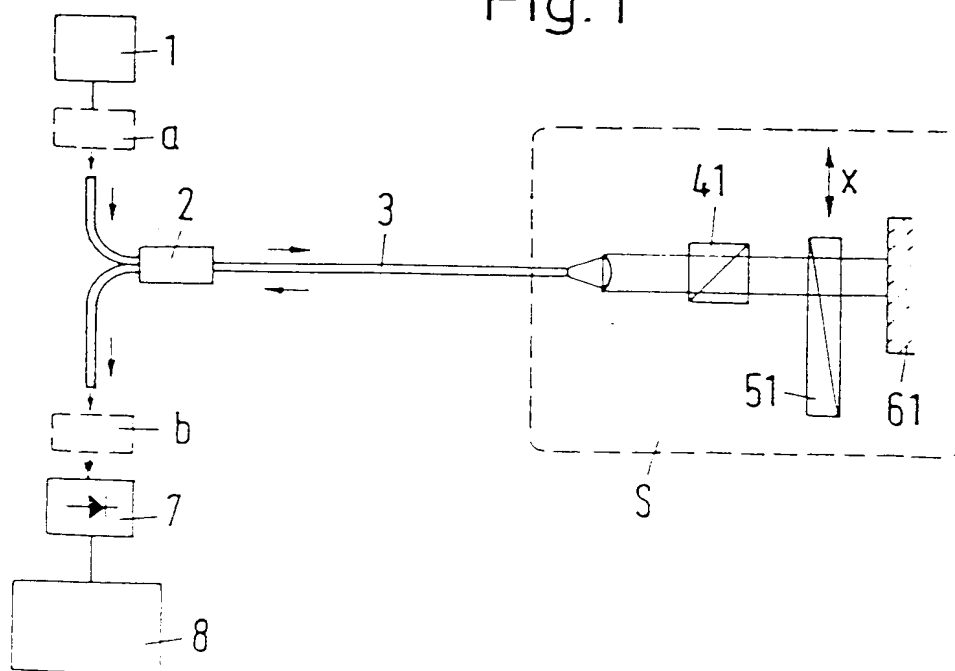


Fig. 1



01.07.88

3820170

14 *

Fig. 3

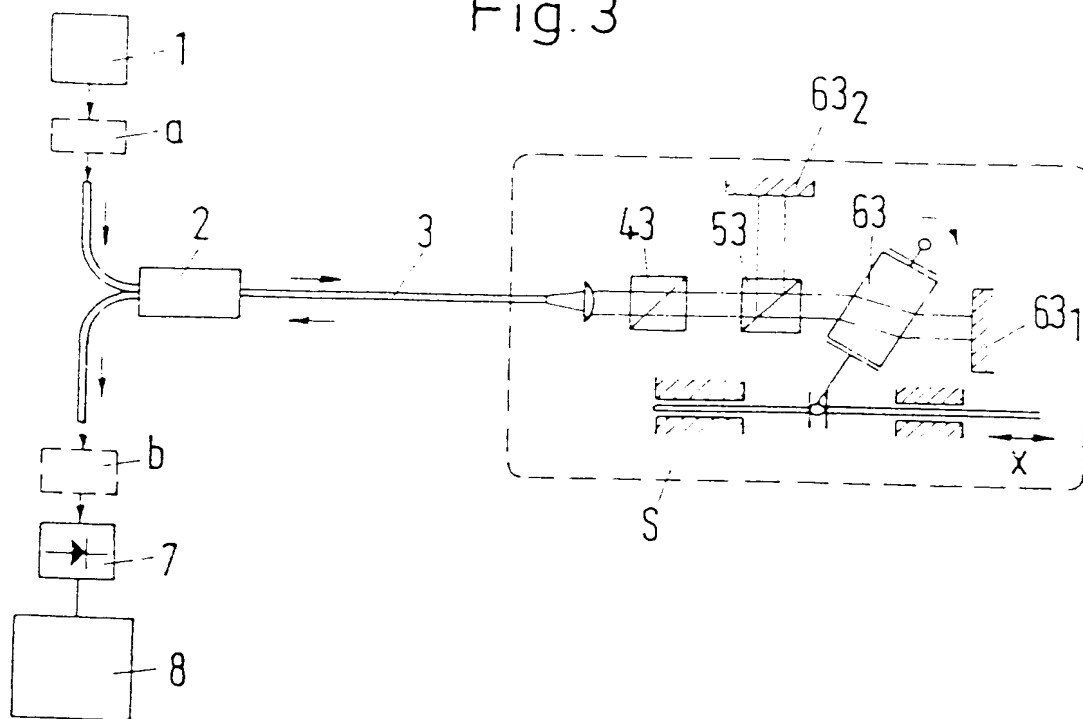
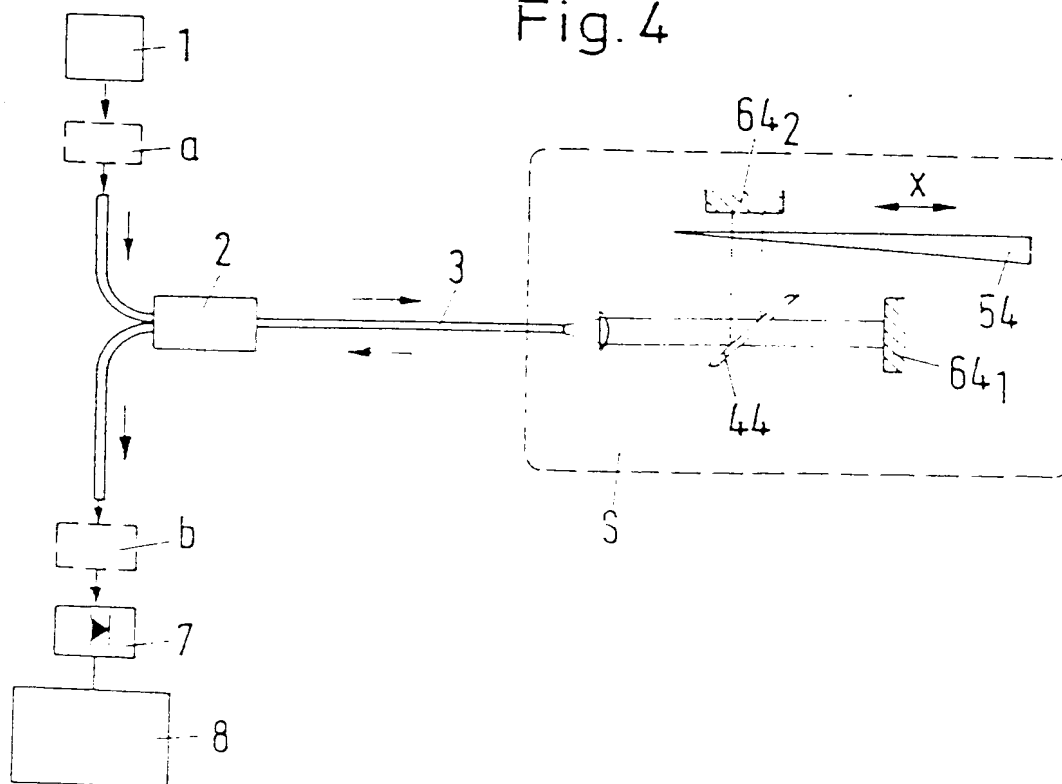


Fig. 4



100

101

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200